

СТРУКТУРА И ЭНЕРГИЯ АГРЕГАТОВ ДИЗЕЛЬНОЙ САЖИ В ПОТОКЕ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

В.П. Пушнин, к.т.н., доц.

Новосибирская государственная академия водного транспорта

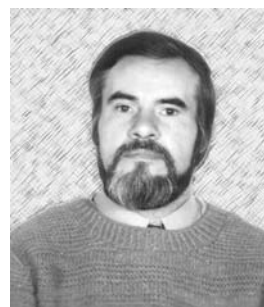
В статье приведены результаты исследования структуры дизельной сажи перед открытием выпускного клапана дизеля. Исследован механизм образования агрегатов третичных структур сажи после открытия выпускного клапана. Определены размеры агрегатов вторичных и третичных структур дизельной сажи, при которых эти частицы участвуют в разрушении рабочей поверхности клапана. Предложены зависимости, позволяющие рассчитать энергию агрегатов сажи в потоке газов.

Агрегаты дизельной сажи представляют интерес, прежде всего, как частицы, участвующие в газоабразивной эрозии поверхности фаски выпускных клапанов дизеля [1]. С другой стороны, информация о размерах и энергии агрегатов дизельной сажи в потоке отработавших газов необходима для оценки возможности улавливания ее в устройствах, использующих инерцию частиц.

Применительно к промышленной саже рассматривают ее первичные и вторичные структуры [2]. В работе [3] по отношению к дизельной саже добавлен термин «третичные структуры». При этом не рассмотрены условия и место их образования. Кроме того, в классификации представлены и совершенно непрочные наложения рыхлых структур.

В настоящей работе получили развитие исследования, результаты которых приведены в публикации [1], где приводились данные о разных значениях насыпной плотности дизельной сажи различных сортов топлива. В основном исследовалась сажа дизеля 1Ч 8,5/11 при его работе на дизельном летнем топливе и топливе моторном ДМ. Насыпная плотность составляла от 56 до 108 кг/м³ соответственно. Отбор проб сажи осуществлялся при помощи мультициклона; улавливалось ее примерно 25 % по массе. Режим работы дизеля на различных топливах задавался таким, чтобы сажесодержание было одинаковым и очень высоким, в пределах 1,0–1,1 г/м³.

Для исследования дисперсности и структуры дизельной сажи ее отобранные пробы направ-



лялись на распыливающе-осаждающее устройство с препаратификатором (рис. 1).

Проба сажи объемом 4–5 мм³ засыпалась внутрь горизонтального участка трубки 4. Для ее распыливания подавался импульс воздуха и одновременно включался секундомер. Скорость воздуха на выходе из разгонной трубки составляла примерно 60 м/с. Разгоняющий поток распространялся на 100–110 мм. Высота h при исследовании скорости осаждения мелких частиц составляла 155 мм (с крупными частицами 280 мм). Следовательно, ни одна частица не могла осесть вместе с потоком воздуха. Чем крупнее и плотнее частицы, тем быстрее они проходили расстояние h . Это позволяло разделить их по размерам за счет разного времени осаждения и улавливания на нескольких установленных последовательно препаратификаторах.

Осажденные частицы сажи впоследствии подвергались оптико-микроскопическим исследованиям. После осаждения в прорезь рамки укладывалась вторая прозрачная пленка, которая удерживалась клейким слоем первой. Подготов-

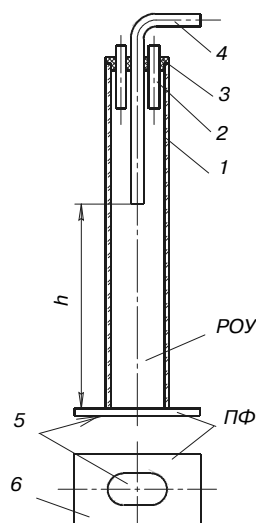


Рис. 1. Осаждение частиц на препаратификаторе при помощи распыливающе-осаждающего устройства:

ПФ — препаратификатор; РОУ — распыливающе-осаждающее устройство; 1 — труба ограждения; 2 — воздухоотводящая трубка; 3 — крышка; 4 — разгонная трубка с навеской частиц; 5 — пленка прозрачная с клейким слоем; 6 — рамка

ленные препараты исследовались под микроскопом сравнения МС-51 в проходящем свете при разном увеличении в зависимости от решаемой задачи. Максимальное увеличение равнялось $\times 1800$. При этом предельная разрешающая способность установленного объектива составляла $0,22 \text{ мкм}$. Оценка размеров частиц производилась при помощи объект-микрометра с ценой деления 10 мкм .

Основой формирования вторичных, а затем и третичных структур дизельной сажи являются первичные частицы. В соответствии с опубликованными данными [2] по структуре промышленной сажи, вошедшими в обзоры многочисленных публикаций, строение первичной частицы (рис. 2) не зависит от способа производства сажи. Первичная частица в основном состоит из кристаллитов углерода, имеющих 3–5 слоев. В плоскости слоя строение такое же, как у графита, перпендикулярно плоскости слоя упорядоченность атомов отсутствует. Размеры кристаллита: $L_c = (1,5–3,0)10^{-3} \text{ мкм}$, $L_a = (1,0–2,0)10^{-3} \text{ мкм}$. Имеются также единичные слои и неорганизованный углерод. С краевыми атомами кристаллитов и единичных слоев связан водород и углеводородные остатки топлива.

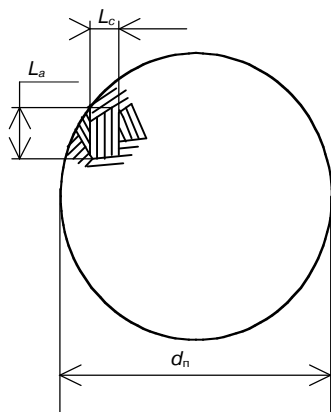


Рис. 2. Строение первичной частицы

Учитывая большое количество кристаллитов в первичной частице, можно предположить, что по краям кристаллитов и единичных слоев сосредоточены также минеральные частицы. Это не существенно для промышленной сажи, но важно для дизельной. Действительно, печная сажа (наиболее близкая по условиям образования и сжигаемому продукту к дизельной саже), согласно [2], состоит на 97,33–99,00 % из углерода; 2,47–0,90 % приходятся на водород, серу, кислород и только 0,20–0,10 % составляет минеральный остаток. Содержание углерода в дизельной саже меньше. По данным [4] в саже выпускных газов дизеля 1Ч9,5/10 углерода содержалось всего 73,5 %, на водород приходилось 2 %, следовательно, на другие составляющие остается еще 24,5 %. В основном, как следует из публикации [5], это химические соединения минеральных элементов с кислородом. В работе [6] сделан вывод о том, что минеральные элементы топлива уже вошли в структуру первичной частицы.

Диаметр d_n первичных частиц дизельной сажи, согласно исследованиям [3], находится в пределах от $0,015$ до $0,17 \text{ мкм}$.

Используя материалы публикаций [2, 3, 7], а также данные собственных исследований, автором предлагается следующая гипотеза образования дизельной сажи.

В дизеле сажа образуется при переменной температуре от $1500–1700$ до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$. Нижняя граница указана исходя из известного опыта [7] по образованию сажевых частиц при термическом разложении метана. Для сравнения температура в зоне образования промышленной сажи постоянная и равна $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ при производстве высокодисперсной сажи и $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ — при получении мелкодисперсной сажи [8]. В этот период, согласно исследованиям [2, 7], промышленной сажи, происходит образование первичных частиц и прочных, вследствие валентных связей на участке касания, цепочек первичных частиц. Очевидно, тот же механизм образования должен быть и в цилиндре дизеля.

Период более низкой температуры до открытия выпускного клапана можно определить как высокотемпературный период структурных преобразований дизельной сажи. Перед открытием выпускного клапана в цилиндре, предположительно, преобладают вторичные структуры в виде разветвленных цепочек первичных частиц (рис. 3, а). Наблюдать такие образования удалось при модельных испытаниях, описанных ниже. Кроме того, имеется незначительное количество линейных цепочек из малого количества крупных первичных частиц (рис. 3, б) и агрегатов вторичных структур сферической или почти сферической формы (рис. 3, в). Агрегаты вторичных структур сажи образованы вследствие коагуляции первичных частиц. Линейные цепочки образованы также из выросших, но в меньшей степени, первичных частиц. При этом цепочки из наиболее крупных частиц (см. рис. 3, б) образовались при сжигании моторного топлива ДМ.

Для определения условий и места образования третичных структур сажи в цилиндре дизеля потребовались исследования на модели (рис. 4). Дымовые газы отбирались от газотрубного оборотного котла КОАВ 63 при его работе на дизельном топливе. Высокая для условий сжигания

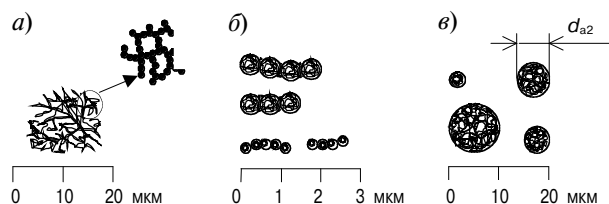


Рис. 3. Структуры сажи в цилиндре перед открытием выпускного клапана

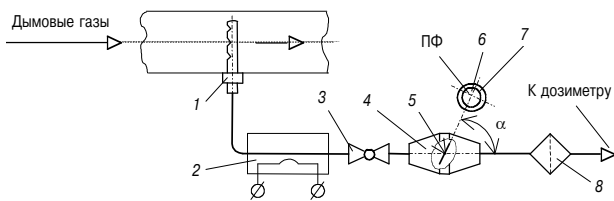


Рис. 4. Схема установки осаждения сажи из дымовых газов при помощи дозиметра:

1 — зонд; 2 — противоконденсатный подогреватель; 3 — кран; 4 — камера осаждения; 5 — мишень с закрепленным препаратом ПФ; 6 — пленка прозрачная с клейким слоем; 7 — рамка; 8 — «абсолютный» фильтр; α — угол наклона мишени

топлива в котле концентрация сажи в продуктах сгорания, равная $0,09 \text{ г/м}^3$ (определялась с использованием фильтра 8 при протягивании через него определенного объема газов) была получена заменой штатного распылителя. Общее время образования сажи, пребывания ее в температурном диапазоне образования и высокотемпературный период структурных преобразований составляло несколько сотых секунды — примерно как в малооборотном дизеле.

До определенного угла наклона мишени — на препаратфиксаторе в основном оседали агрегаты, близкие к сферической форме, диаметром от 2 до 8 мкм. В обтекающем мишень потоке преимущественно находились вторичные структуры сажи в виде разветвленных цепочек первичных частиц. Некоторое количество этих структурных образований было занесено на препаратфиксатор. Вид одной из таких частиц при увеличении $\times 1800$ показан ранее на рис. 3, а. Здесь же приведена ее предполагаемая структура в соответствии с [2].

После некоторого увеличения угла наклона мишени α и соответствующего уменьшения щели между мишенью 5 и внутренней частью камеры 4, начали образовываться и оседать на препаратфиксаторе третичные структуры. В дизеле подобным местным сопротивлением является щель между выпускным клапаном и его седлом. Подробнее эксперименты с использованием модельной установки приведены в статье [9].

С открытием выпускного клапана дизеля сохраняются линейные цепочки из крупных первичных частиц и агрегаты вторичных структур. Большинство вторичных структур, ранее находящихся в виде разветвленных цепочек, наслаиваются перед выпускным клапаном. Более крупные наслоения, обладая инерционностью, уже не просто обтекают выпускной клапан, а могут по нему ударить, а также могут соударяться между собой, не объединяясь. При этом происходит частичное разрушение периферийной части наслоений. В результате в потоке появляет-

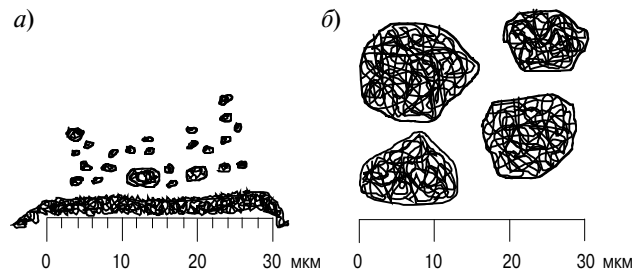


Рис. 5. Осколки частиц и мелкие агрегаты третичных структур сажи

ся большое количество мелких осколков, и формируются агрегаты третичных структур сажи более гладкой формы. На рис. 5, а и б даны зарисовки осколков, образованных при ударе крупной частицы о поверхность препаратфиксатора (видимых при увеличении $\times 1800$) и мелких агрегатов третичных структур сажи. При ударе образуются осколки менее 1 мкм, но при указанном максимально возможном увеличении не просматривается их форма, кроме того, две мелкие частицы, расположенные рядом, могут смотреться как одна. Размеры агрегатов третичных структур сажи, приведенных на зарисовках, относятся к самым мелким из тех (более крупные в плоскости выглядят так же), которые удалось отобрать при помощи мультициклона.

Минимальное значение диаметра агрегатов вторичных структур d_{a2} , отбираемых при помощи мультициклона, составило 3–4 мкм для сажи моторного топлива ДМ и 4–5 мкм — для сажи дизельного топлива. Даже из этого видно, что агрегаты вторичных структур более плотные.

Для сопоставления агрегатов по полученной энергии при разгоне газовой средой были проведены испытания с использованием установки, приведенной на рис. 1. Настроенная высота h составляла 155 мм. Частицы последовательно осаждались на трех препаратфиксаторах, при этом периоды осаждения частиц составляли:

- на первом — с пятой по десятую секунду;
- на втором — с десятой по двадцатую секунду;
- на третьем — с двадцатой по сороковую секунду.

Время перехода на последующий препаратфиксатор равнялось 0,4 с и не вносило большой погрешности. Для повышения точности экспериментов осаждение на каждом препаратфиксаторе проводилось 5 раз. Увеличение при исследовании на микроскопе сравнения составляло $\times 800$. Предельная разрешающая способность установленного объектива соответствовала 0,45 мкм.

Размер агрегатов третичных структур оценивался условным диаметром. В качестве условного диаметра принят минимальный диаметр ок-

Средний условный размер агрегатов сажи на препаратификсаторах

Топливо	Агрегаты структур сажи	Средний размер частиц на препаратификсаторах, мкм		
		№ 1	№ 2	№ 3
Дизельное	Вторичных	10,30	9,50	8,99
	Третичных	42,18	35,34	32,56
Моторное ДМ	Вторичных	8,96	7,10	6,21
	Третичных	24,43	21,05	19,69

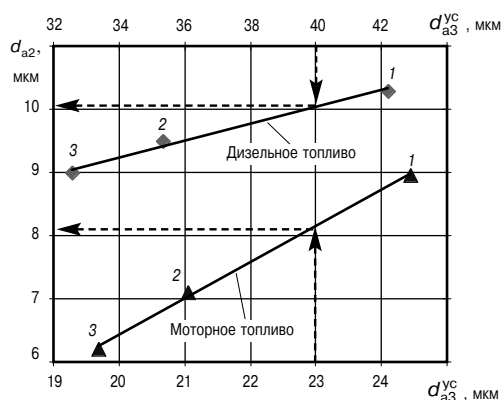


Рис. 6. Эквивалентность по полученной энергии агрегатов вторичных и третичных структур дизельной сажи (сопоставление при условном диаметре):

1–3 — номер препаратификсатора

ружности, в которую может быть вписана проекция агрегата. Первоначальные результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице.

Данные таблицы аппроксимированы линейными зависимостями (рис. 6). Небольшое (0,1 мкм) среднее квадратичное отклонение опытных точек от аппроксимирующего полинома показывает, что частицы во всех случаях осаждались за счет полученной энергии воздушного импульса.

Из полученных результатов можно, например, заключить, что в варианте с сажей дизельного топлива одинаковую энергию получили агрегаты третичных структур условным диаметром 40 мкм и агрегаты вторичных структур диаметром 10,05 мкм. В варианте с сажей моторного топлива ДМ одинаковую энергию получили агрегаты третичных структур условным диаметром 23 мкм и агрегаты вторичных структур диаметром 8,05 мкм. Соотношение d_{a3}^{yc}/d_{a2} составило 3,8 и 2,9 для сажи дизельного и моторного ДМ топлив соответственно. В первом приближении можно считать, что такие же соотношения сохраняются и при величинах агрегатов, выходящих за диапазоны размеров, указанных на рис. 6. Полученные неодинаковые соотношения d_{a3}^{yc}/d_{a2} для сажи разных топлив позволяет предположить, что

форма агрегатов третичных структур у них в среднем будет несколько отличаться. Поэтому вводится понятие приведенного диаметра агрегата d_{a3}^{np} , под которым понимается диаметр шара, объем которого будет равен объему частицы с размером d_{a3}^{yc} . Значение d_{a3}^{np} , мкм, предлагается определять из выражения

$$d_{a3}^{np} = \sqrt[3]{k_{\phi} \cdot d_{a3}^{yc}}, \quad (1)$$

где k_{ϕ} — коэффициент формы агрегата.

Для шара $k_{\phi} = 1$; для исследуемых частиц другой формы определяется по данным эксперимента при сопоставлении кинетической энергии частиц.

Кинетическую энергию E_k , Дж, агрегата сажи произвольной формы можно записать в виде

$$E_k = \frac{\rho_a \cdot k_{\phi} \cdot \pi \cdot d_a^3 \cdot v_a^2}{12} 10^{-18}, \quad (2)$$

где ρ_a — плотность агрегата сажи, кг/м³; d_a — диаметр агрегата сажи (для агрегатов третичных структур — условный), мкм; v_a — скорость агрегата в рассматриваемый период времени, м/с.

В работе [6] экспериментально определены плотность агрегатов вторичных ρ_{a2} и третичных ρ_{a3} структур сажи рассматриваемых двух топлив, которые составили:

➤ для дизельного топлива $\rho_{a2} = 940$ кг/м³, $\rho_{a3} = 84$ кг/м³;

➤ для моторного топлива ДМ $\rho_{a2} = 1780$ кг/м³, $\rho_{a3} = 162$ кг/м³.

Скорость агрегата во время движения его с потоком газовой среды, скорость которого v известна, можно определить из графика (рис. 7), полученного путем преобразования зависимости для золы угля, приведенной в работе [10] к безразмерному по скорости виду. Пунктирная линия — условна, поскольку скорость очень мелких частиц практически равна скорости газа.

Приведенных материалов достаточно для определения значений коэффициента формы

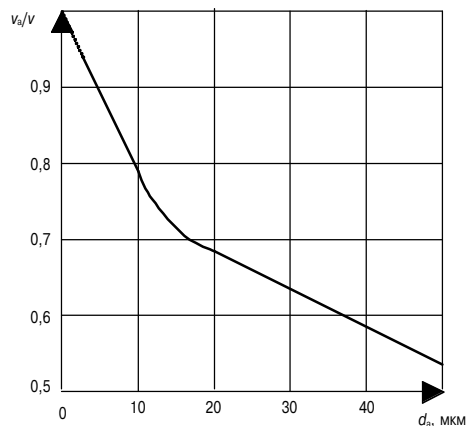


Рис. 7. Зависимость относительной скорости частицы от ее размера

для агрегатов третичных структур сажи рассматриваемых двух топлив. Нетрудно видеть, что значение k_{Φ} будет равно

$$k_{\Phi} = \frac{\rho_{a2}}{\rho_{a2}} \cdot \frac{(d_{a2})^3}{(d_{a3}^{yc})^3} \cdot \frac{(v_{a2})^2}{(v_{a3})^2}, \quad (3)$$

где подстрочные символы а2 и а3 относятся к агрегатам вторичных и третичных структур сажи, соответствие диаметров берется из таблицы.

Полученные значения k_{Φ} были несколько скорректированы с учетом другого очевидного равенства

$$\frac{\rho_{a3 \text{ диз}}}{\rho_{a3 \text{ мот}}} \cdot \frac{k_{\Phi \text{ диз}}}{k_{\Phi \text{ мот}}} \cdot \frac{(d_{a3 \text{ диз}}^{yc})^3}{(d_{a3 \text{ мот}}^{yc})^3} \cdot \frac{(v_{a3})^2}{(v_{a2})^2} = 1, \quad (4)$$

где подстрочные символы диз. и мот. относятся к агрегатам третичных структур сажи дизельного и моторного топлива ДМ; соответствие диаметров берется из таблицы.

Окончательно среднее арифметическое по трем препаратификсаторам значение коэффициента формы агрегатов третичных структур сажи дизельного топлива составило 0,34, а для сажи моторного топлива — 0,64.

Полученные разные значения $k_{\Phi \text{ диз}}$ и $k_{\Phi \text{ мот}}$ качественно подтвердили предположение, высказанное при анализе данных, приведенных на рис. 6. Количественно это можно подтвердить, анализируя данные, приведенные на рис. 8. Действительно для вариантов с теми же по диаметру агрегатами вторичных структур, что и в рассмотренном случае, соотношение d_{a3}^{np}/d_{a2} составило 2,8 и 2,6 для сажи дизельного и моторного ДМ топлив соответственно, что достаточно близко.

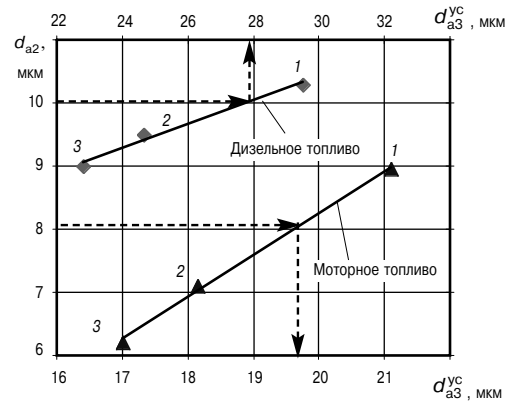


Рис. 8. Эквивалентность по полученной энергии агрегатов вторичных и третичных структур дизельной сажи (сопоставление при приведенном диаметре):

1–3 — номер препаратификсатора

Испытания на модели и выведенные соотношения d_{a3}^{yc}/d_{a2} позволили уточнить минимальный размер агрегатов сажи, которые могут отклоняться от потока газов вследствие инерционных сил. Для сажи дизельного топлива — это агрегаты вторичных структур диаметром более 2 мкм и агрегаты третичных структур условным диаметром более 7–8 мкм. Частицы такого размера уже могут участвовать в газообразном износе поверхности фаски выпускных клапанов дизелей. Агрегаты сажи дизельного топлива, начиная с указанных размеров можно улавливать после выхода из цилиндра устройствами, использующими инерцию частицы, при этом эффективность улавливания будет увеличиваться прямо пропорционально размерам и плотности частиц.

Литература

1. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Пушкин В.П. Основные факторы, определяющие скорость газообразного износа посадочной фаски выпускных клапанов дизелей // Двигателестроение. — 1985. — № 4. — С. 16–18.
2. Печковская К.А. Сажа как усилитель каучука. — М.: Химия, 1967. — 216 с.
3. Мачульский Ф.Ф. Дисперсность и структура дизельной сажи // Токсичность двигателей внутреннего сгорания и пути ее снижения: симпозиум. — М., 1966. — С. 206–219.
4. Баранов Н.А., Смайлис В.И. Исследование высокотемпературной сублимации и дисперсного состава дизельной сажи // Тр. ЦНИДИ. — Л., 1980. — С. 82–89.
5. Пушкин В.П., Сисин В.Д. Исследование состава сажи выпускных газов дизелей // Энергетические установки речных судов: сб. научн. тр. — Новосиб.

ин.-т инж. водн. трансп., 1991. — С. 34–40.

6. Пушкин В.П. Определение плотности агрегатов сажи с использованием образцов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2007. — № 2. — С. 133–137.

7. Кельцев В.В., Теснер П.А. Сажа. Свойства, производство, применение. — М.–Л.: Гостоптехиздат, 1952. — 172 с.

8. Зув В.П., Михайлов В.В. Производство сажи. — М.: Химия, 1965. — 277 с.

9. Пушкин В.П. Отбор агрегатов вторичных структур сажи // Сибирский научный вестник / Новосибирский научный центр «Ноосферные знания и технологии»; Российская Академия естественных наук. Вып. VIII. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. водн. трансп., 2005. — С. 72–76.

10. Алферов Н.С. Ударная эрозия рабочих лопаток газовой турбины на твердом топливе: автореферат дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1952. — 28 с.